

**BEST AVAILABLE COPY**



REG 09 JAN 2004

WIPO PCT

**PRIORITY DOCUMENT**  
SUBMITTED OR TRANSMITTED IN  
COMPLIANCE WITH  
RULE 17.1(a) OR (b)

**Prioritätsbescheinigung über die Einreichung  
einer Patentanmeldung**

**Aktenzeichen:** 102 50 868.2

**Anmeldetag:** 31. Oktober 2002

**Anmelder/Inhaber:** Infineon Technologies AG, München/DE

**Bezeichnung:** Vertikal integriertes Bauelement, Bauelement-Anordnung und Verfahren zum Herstellen eines vertikal integrierten Bauelements

**IPC:** B 82 B, H 01 L

**Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ursprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.**

München, den 11. November 2003  
Deutsches Patent- und Markenamt  
Der Präsident  
Im Auftrag



## Beschreibung

Vertikal integriertes Bauelement, Bauelement-Anordnung und Verfahren zum Herstellen eines vertikal integrierten

### 5 Bauelements

Die Erfindung betrifft ein vertikal integriertes Bauelement, eine Bauelement-Anordnung und ein Verfahren zum Herstellen eines vertikal integrierten Bauelements.

10

Die herkömmliche Silizium-Mikroelektronik wird bei weiter voranschreitender Verkleinerung an ihre Grenzen stoßen. Insbesondere die Entwicklung zunehmend kleinerer und dichter angeordneter Transistoren von mittlerweile mehreren hundert  
15 Millionen Transistoren pro Chip wird in den nächsten zehn Jahren prinzipiellen physikalischen Problemen und Begrenzungen ausgesetzt sein. Wenn Strukturabmessungen von ungefähr 80nm unterschritten werden, werden die Bauelemente durch Quanteneffekte störend beeinflusst und unterhalb von  
20 Dimensionen von etwa 30nm dominiert. Auch führt die zunehmende Integrationsdichte der Bauelemente auf einem Chip zu einem dramatischen Anstieg der Abwärme.

Als mögliche Nachfolgetechnik der herkömmlichen Halbleiterelektronik sind Nanostrukturen wie beispielsweise Nanoröhren, insbesondere Kohlenstoffnanoröhren, und Nanostäbchen, auch Nanodrähte genannt, bekannt.

Einen Überblick über die Technologie der

30 Kohlenstoffnanoröhren gibt beispielsweise [1]. Eine Kohlenstoffnanoröhre ist eine einwandige oder mehrwandige, röhrenartige Kohlenstoffverbindung. Bei mehrwandigen Nanoröhren ist mindestens eine innere Nanoröhre von einer äußeren Nanoröhre coaxial umgeben. Einwandige Nanoröhren  
35 weisen typischerweise Durchmesser von 1nm auf, die Länge einer Nanoröhre kann mehrere Hundert nm betragen. Die Enden

einer Nanoröhre sind häufig mit jeweils einem halben Fulleren-Molekül abgeschlossen. Nanoröhren können hergestellt werden, indem auf einem Substrat eine Katalysatormaterial-Schicht, beispielsweise aus Eisen, Kobalt oder Nickel, abgeschieden wird und auf dieser Katalysatormaterial-Schicht unter Verwendung eines CVD-Verfahrens ("chemical vapour deposition") mittels Einleitens eines kohlenstoffhaltigen Materials (beispielsweise Azetylen) in die Verfahrenskammer Kohlenstoffnanoröhren auf der Katalysatormaterial-Schicht aufgewachsen werden. Aufgrund der guten elektrischen Leitfähigkeit von Kohlenstoffnanoröhren sowie aufgrund der Einstellbarkeit dieser Leitfähigkeit, beispielsweise mittels Anlegens eines externen elektrischen Feldes oder mittels Dotierens der Nanoröhren beispielsweise mit Kalium, eignen sich Nanoröhren für eine große Zahl von Anwendungen, insbesondere in der elektrischen Kopplungstechnik in integrierten Schaltkreisen, für Bauelemente in der Mikroelektronik sowie als Elektronenemitter.

Für viele integrierte Bauelemente in der Silizium-Mikroelektronik werden Feldeffekttransistoren benötigt. Zum Ausbilden eines solchen Feldeffekttransistors kann eine Kohlenstoffnanoröhre verwendet werden, wodurch ein sogenannter CNT-FET ("carbon nanotube field effect transistor") gebildet wird. Hierfür wird beispielsweise eine Nanoröhre auf einer dielektrischen Schicht auf einem leitfähigen Substrat planar ausgebildet und kontaktiert. Die Leitfähigkeit der Kohlenstoffnanoröhre wird über eine geeignete an dem leitfähigen Substrat angelegte elektrische Spannung gesteuert, so dass der elektrische Stromfluss durch die Nanoröhre, anschaulich der elektrische Stromfluss zwischen den Source-/Drain-Anschlüssen des CNT-FETs, mittels Anlegens einer Spannung an das leitfähige Substrat steuerbar ist.

Ein Verfahren zum Ausbilden eines Feldeffekttransistors unter Verwendung einer Kohlenstoffnanoröhre ist beispielsweise in [2] beschrieben. Gemäß dem in [2] beschriebenen Verfahren wird auf einem Silizium-Substrat zunächst eine Siliziumdioxid-Schicht ausgebildet und auf dieser werden Kontaktierungs-Pads ausgebildet. Dann wird eine Kohlenstoffnanoröhre zwischen zwei Kontaktierungs-Pads aufgebracht und mit den Kontaktierungs-Pads kontaktiert, wobei die Leitfähigkeit der Kohlenstoffnanoröhre mittels Anlegens einer Spannung an das Silizium-Substrat steuerbar ist. Die Größe des elektrischen Stromflusses zwischen den beiden Endabschnitten einer Kohlenstoffnanoröhre ist bei einer vorgegebenen elektrischen Spannung von der Leitfähigkeit der Kohlenstoffnanoröhre abhängig und daher mittels der elektrischen Spannung an dem Silizium-Substrat steuerbar.

Ferner ist aus [2] bekannt, eine halbleitende Kohlenstoffnanoröhre wahlweise des p-Leitungstyps oder des n-Leitungstyps herzustellen. Beim herkömmlichen Ausbilden einer Kohlenstoffnanoröhre wird diese häufig im p-Leitungszustand erhalten. Mittels Temperns im Vakuum oder mittels Dotierens mit Kalium-Ionen kann eine Kohlenstoffnanoröhre des p-Leitungstyps in eine Kohlenstoffnanoröhre des n-Leitungstyps umgewandelt werden.

Allerdings weist das aus [2] bekannte Verfahren den Nachteil auf, dass lediglich eine Herstellung planarer, horizontal orientierter Nanoröhren auf einem Substrat ermöglicht ist. Ein Kohlenstoffnanoröhren-Feldeffekttransistor mit einer horizontal auf einem Substrat ausgebildeten Nanoröhre weist jedoch den Nachteil auf, dass der Platzbedarf eines solchen Bauelements auf der Oberfläche eines Substrats groß ist, so dass die Integrationsdichte von Bauelementen, beispielsweise Kohlenstoffnanoröhren-Feldeffekttransistor, auf einem Substrat gering ist.

Alternativ zu Nanoröhren, insbesondere zu Kohlenstoffnanoröhren, werden Nanostäbchen, auch Nanodrähte genannt, als Nanostrukturen für einen integrierten Schaltkreis verwendet. Beispielsweise ist aus [3] bekannt, ein Bündel von vertikalen Zinkoxid-Nanodrähten auf einem Gold-Katalysator, der auf einem Saphir-Substrat aufgebracht ist, auszubilden. Auf diese Weise können freistehende Zinkoxid-Nanodrähte mit Durchmessern von ungefähr 40nm bis 150nm hergestellt werden, mit einer Dichte von ungefähr  $10^3$  Drähten pro  $\text{cm}^2$ . Gemäß dem aus [3] bekannten Konzept werden Bündel von Zinkoxid-Nanodrähten als Laserkomponenten verwendet.

Ferner ist aus [4] bekannt, Feldeffekttransistoren und logische Gatter aus horizontalen, auf einer Substratoberfläche gebildeten, gekreuzten Nanodrähten aus p-dotiertem Silizium und n-dotiertem Galliumnitrid herzustellen.

Allerdings werden die Nanodrähte gemäß [4] nur in, horizontaler Richtung auf einer Substratoberfläche planar ausgebildet und kontaktiert. Da dadurch die Dimension eines erhaltenen Bauelements durch die Länge einer Nanostruktur (in der Größenordnung Mikrometer) bestimmt ist, läuft das aus [4] bekannte Verfahren dem Bedürfnis nach einer fortschreitenden Miniaturisierung zuwider.

Aus [5] ist bekannt, in eine dicke Gate-Elektroden-Schicht ein Durchgangsloch einzubringen und in diesem ein vertikales Nanelement aufzuwachsen. Dadurch wird ein vertikaler Feldeffekttransistor mit dem Nanelement als Kanal-Bereich erhalten, wobei die elektrische Leitfähigkeit des Kanal-Bereichs mittels des das Nanelement entlang annähernd seiner gesamten Längserstreckung umgebenden Gate-Elektroden-Bereichs steuerbar ist.

Der Erfindung liegt das Problem zugrunde, die Integrationsdichte von ausreichend präzise steuerbaren Bauelementen mit einer Nanostruktur zu erhöhen und

5 empfindliche Nanostrukturen so vorzusehen, dass sie vor einer mechanischen Schädigung geschützt sind.

Das Problem wird durch ein vertikal integriertes Bauelement, eine Bauelement-Anordnung und ein Verfahren zum Herstellen

10 eines vertikal integrierten Bauelements mit den Merkmalen gemäß den unabhängigen Patentansprüchen gelöst.

Erfindungsgemäß ist ein vertikal integriertes Bauelement mit einer ersten elektrisch leitfähigen Schicht, einer teilweise

15 aus dielektrischem Material ausgebildeten Mittel-Schicht auf der ersten elektrisch leitfähigen Schicht und einer zweiten elektrisch leitfähigen Schicht auf der Mittel-Schicht geschaffen. Ferner ist eine in ein in die Mittel-Schicht eingebrachtes Durchgangsloch integrierte Nanostruktur mit

20 einem ersten, mit der ersten elektrisch leitfähigen Schicht gekoppeltem Endabschnitt und mit einem zweiten, mit der zweiten elektrisch leitfähigen Schicht gekoppelten Endabschnitt bereitgestellt. Die Mittel-Schicht weist zwischen zwei benachbarten dielektrischen Teilschichten eine dritte elektrisch leitfähige Schicht auf, deren Dicke geringer ist als die Dicke von zumindest einer der dielektrischen Teilschichten.

Ferner ist erfindungsgemäß eine Bauelement-Anordnung mit

30 mindestens zwei nebeneinander angeordneten und/oder mit mindestens zwei übereinander angeordneten Bauelementen mit den oben genannten Merkmalen bereitgestellt.

Gemäß dem Verfahren zum Herstellen des vertikal integrierten

35 Bauelements wird eine erste elektrisch leitfähige Schicht ausgebildet, wird eine Mittel-Schicht teilweise aus

dielektrischem Material ausgebildet und wird ein Durchgangsloch in die Mittel-Schicht eingebracht. Ferner wird in dem Durchgangsloch eine Nanostruktur mit einem ersten Endabschnitt und einem zweiten Endabschnitt ausgebildet, wobei der erste Endabschnitt mit der ersten elektrisch leitfähigen Schicht gekoppelt wird. Es wird eine zweite elektrisch leitfähige Schicht auf der Mittel-Schicht ausgebildet und mit dem zweiten Endabschnitt der Nanostruktur gekoppelt. Die Mittel-Schicht wird derart ausgebildet, dass zwischen zwei benachbarten dielektrischen Teilschichten eine dritte elektrisch leitfähige Schicht ausgebildet wird, deren Dicke geringer ist als die Dicke von zumindest einer der dielektrischen Teilschichten.

Eine Grundidee der Erfindung ist darin zu sehen, dass mittels der in der Mittelschicht enthaltenen ausreichend dünnen dritten elektrisch leitfähigen Schicht die elektrische Leitfähigkeit eines daran angrenzenden Bereichs der Nanostruktur sicher steuerbar ist. Somit kann das vertikal integrierte Bauelement als Feldeffekttransistor-ähnliches Bauelement betrieben werden, wobei die dritte elektrisch leitfähige Schicht in diesem Fall als Gate-Elektroden-Schicht dient, wohingegen die Nanostruktur anschaulich als Kanal-Bereich dient. Da die dritte elektrisch leitfähige Schicht erfindungsgemäß ausreichend dünn vorgesehen ist, bildet sich bei Anlegen einer elektrischen Spannung an die dritte elektrisch leitfähige Schicht aufgrund eines elektrostatischen Spitzeneffekts in einem angrenzenden Umgebungsbereich der Nanostruktur ein besonders starkes elektrisches Feld aus, mit anderen Worten erfolgt eine Feldkonzentration. Mittels des Feldeffekts ist die elektrische Leitfähigkeit in dem an die dritte elektrisch leitfähige Schicht angrenzenden Bereich der Nanostruktur mit sehr hoher Genauigkeit steuerbar.

Ein weiterer Vorteil ist darin zu sehen, dass die geometrische Lage der dritten elektrisch leitfähigen Schicht innerhalb der Mittel-Schicht mittels eines Abscheide-Verfahrens, nicht mittels eines lithographischen Verfahrens, vorgebar ist. Mittels eines Abscheide-Verfahrens (beispielsweise ALD, "Atomic Layer Deposition") kann die Dicke einer jeweiligen Schicht mit einer Genauigkeit von bis zu einer Atomlage, das heißt bis auf wenige Angström genau eingestellt werden. Die gewünschte Lage und Dicke der dritten elektrisch leitfähigen Schicht innerhalb der Mittelschicht ist somit erfindungsgemäß sehr exakt definierbar. Somit ist bei dem erfindungsgemäßen vertikal integrierten Bauelement in seiner Ausgestaltung als Feldeffekttransistor wahlweise ein sicheres Sperren bzw. ein sicheres Leiten des Kanal-Bereichs des Feldeffekttransistors ermöglicht, wobei der jeweils gewünschte Betriebszustand mittels Anlegens oder Nichtanlegens einer Spannung an die dritte elektrisch leitfähige Schicht einstellbar ist.

20 Anschaulich ist erfindungsgemäß die Einstellbarkeit der elektrischen Leitfähigkeit der Nanoröhre gegenüber dem Stand der Technik dadurch verbessert, dass eine räumlich exakt definierte Stelle der Nanostruktur mittels eines räumlich lokalisierten elektrischen Feldes einer großen Amplitude beeinflusst wird, statt mit einer wenig spezifischen und undefinierten Steuerung der Leitfähigkeit von annähernd einer gesamten Nanostruktur, wie gemäß dem Stand der Technik.

30 Erfindungsgemäß ist es ermöglicht, eine oder mehrere vertikal angeordnete Nanostrukturen, beispielsweise Kohlenstoffnanoröhren, in einem Durchgangsloch aufzuwachsen.

Ein Vorteil des erfindungsgemäßen vertikal integrierten Bauelements besteht in der Miniaturisierung des Bauelements bis in den Bereich lateraler Nanometer-Abmessungen, da der Oberflächenbedarf eines vertikal integrierten Bauelements

prinzipiell nur durch die Querschnittsfläche der Nanostruktur begrenzt ist. Ferner ist erfindungsgemäß die häufig empfindliche Nanostruktur in einer isolierenden und schützenden Matrix aus dem dielektrischen Material der Mittel-Schicht eingebracht. Die räumliche Anordnung von Nanostrukturen unterschiedlicher vertikal integrierter Bauelemente einer erfindungsgemäßen Bauelement-Anordnung ist mittels Vorgebens einer räumlichen Anordnung von Durchgangslöchern realisierbar, in welchen die Nanostrukturen aufgewachsen werden, so dass eine geordnete Anordnung unterschiedlicher Nanostrukturen ermöglicht ist. Ferner ist das Vorhandensein eines kristallinen Substrats entbehrlich.

Das Herstellen von Nanostrukturen, beispielsweise Kohlenstoffnanoröhren in einem vertikalen Kontaktloch, ist technologisch mit vertretbarem Aufwand realisierbar. Ferner ist die Länge der Nanostruktur, beispielsweise einer Kohlenstoffnanoröhre, mittels Einstellens der Dicke der Mittel-Schicht justierbar.

Bevorzugte Weiterbildungen der Erfindung ergeben sich aus den abhängigen Ansprüchen.

Vorzugsweise ist zwischen der ersten leitfähigen Schicht und der Nanostruktur Katalysatormaterial zum Katalysieren des Ausbildens der Nanostruktur angeordnet. Indem Katalysatormaterial räumlich definiert abgeschieden wird, kann das Aufwachsen der Nanostruktur räumlich vorgegeben werden. Das Katalysatormaterial kann beispielsweise lokalisiert in dem Durchgangsloch abgeschieden werden, alternativ kann zwischen der ersten elektrisch leitfähigen Schicht und der Mittel-Schicht eine Katalysatormaterial-Schicht ausgebildet werden, oder es kann bei bestimmten Anwendungen die erste leitfähige Schicht aus einem solchen Material hergestellt werden, dass die erste elektrisch leitfähige Schicht als Katalysator zum Katalysieren des

Ausbildens der Nanostruktur verwendet werden kann. Die erste elektrisch leitfähige Schicht kann aus Eisen-Material hergestellt sein, und daher als Katalysator zum Aufwachsen von Kohlenstoffnanoröhren verwendet werden, da

5 Kohlenstoffnanoröhren besonders gut auf Eisen-Material aufwachsen.

Bei dem Bauelement kann die dritte elektrisch leitfähige Schicht die Nanostruktur in einem Umgebungsbereich des ersten oder des zweiten Endabschnitts umgeben. Die dritte leitfähige Schicht kann funktionell in eine erste und in eine zweite Teilschicht aufgesplittet werden, wobei die erste Teilschicht im Bereich der ersten leitfähigen Schicht und die zweite Teilschicht im Bereich der zweiten leitfähigen Schicht

10 lokalisiert ist. Mit Hilfe dieser aufgesplitteten dritten leitfähigen Schicht ist es möglich, an beiden Endkontakten der Nanostruktur eine optimale Gate-Steuerung der in diesen Bereichen ausgebildeten Schottky-Barrieren auszuüben.

15 Indem die dritte elektrisch leitfähige Schicht die Nanostruktur in einem Umgebungsbereich von einem der Endabschnitte der Nanostruktur, an dem diese an die erste oder die zweite elektrisch leitfähige Schicht angrenzt, umgeben ist, ist eine zusätzliche Verbesserung der Steuerbarkeit der elektrischen Leitfähigkeit der Nanoröhre realisiert. Anschaulich ist zwischen der ersten elektrisch leitfähigen Schicht und dem ersten Endabschnitt der Nanostruktur sowie zwischen der zweiten elektrisch leitfähigen Schicht und dem zweiten Endabschnitt der

20 Nanostruktur jeweils eine Schottky-Barriere gebildet, die auf die elektrische Leitfähigkeit der Nanostruktur in Abhängigkeit von einem möglicherweise angelegten elektrischen Feld besonders sensitiv ist und die sehr stark räumlich lokalisiert ist. Wird die dritte elektrisch leitfähige

25 Schicht nahe des ersten oder des zweiten Endabschnitts ausgebildet, so kann mittels Anlegens einer elektrischen

Spannung an die dritte elektrisch leitfähige Schicht die elektrische Leitfähigkeit der Nanostruktur besonders empfindlich eingestellt werden.

- 5 Die Dicke der dritten elektrisch leitfähigen Schicht kann geringer, vorzugsweise wesentlich geringer, sein als die Dicke von beiden dielektrischen Teilschichten. Vorzugsweise ist das Dickenverhältnis zwischen der ersten bzw. der zweiten dielektrischen Teilschicht einerseits und der dritten elektrisch leitfähigen Schicht mindestens drei, weiter vorzugsweise mindestens fünf, und noch weiter vorzugsweise mindestens zehn.

- Das erfindungsgemäße Bauelement kann ferner als Feldeffekttransistor ausgebildet sein, bei welchem Bauelement 15 der erste Endabschnitt der Nanostruktur als erster Source-/ Drain-Bereich und der zweite Endabschnitt der Nanostruktur als zweiter Source-/Drain-Bereich dient und bei welchem Bauelement in der dritten elektrisch leitfähigen Schicht, die als Gate-Elektrode des Feldeffekttransistors dient, entlang 20 des in die dritte elektrisch leitfähige Schicht eingebrachten Durchgangslochs eine Ringstruktur aus einem elektrisch isolierenden Material als Gate-isolierender Bereich des Feldeffekttransistors angeordnet ist.

- Anschaulich kann in diesem Fall die elektrische Leitfähigkeit der Nanostruktur mittels Anlegens eines geeigneten elektrischen Potentials an die dritte elektrisch leitfähige Schicht gesteuert werden, da ein derartiges elektrisches Potential die elektrische Leitfähigkeit der Nanoröhre 30 aufgrund des Feldeffekts charakteristisch beeinflusst, welche somit in diesem Bereich als Kanal-Bereich eines Feldeffekttransistors verwendet werden kann. Das infolge des elektrischen Potentials der dritten elektrisch leitfähigen Schicht erzeugte elektrische Feld greift aufgrund der 35 ringartigen Struktur der Gate-isolierenden Schicht ausreichend gut auf die Nanostruktur über, was auf das

allseitige Umschließen der mittels der Gate-isolierenden Schicht elektrisch isolierten Gate-Elektrode zurückzuführen ist.

- 5 Ferner kann die Mittel-Schicht eine zusätzliche elektrisch leitfähige Schicht aufweisen, welche mindestens eine zusätzliche elektrisch leitfähige Schicht als zusätzliche Gate-Elektrode des Feldeffekttransistors dient, wobei entlang des in der zusätzlichen elektrisch leitfähigen Schicht
- 10 eingebrachten Durchgangslochs eine zusätzliche Ringstruktur aus einem elektrisch isolierenden Material als zusätzlicher Gate-isolierender Bereich des Feldeffekttransistors angeordnet ist.
- 15 Mit anderen Worten kann das als Feldeffekttransistor ausgestaltete Bauelement einen zusätzlichen oder mehrere zusätzliche Gate-Anschlüsse aufweisen, wodurch die Steuerbarkeit des elektrischen Widerstands der Nanostruktur weiter verbessert ist. Die Möglichkeit des Vorsehens
- 20 zusätzlicher elektrisch leitfähiger Mittel-Schichten als zusätzliche Gate-Anschlüsse beruht wesentlich auf der Tatsache, dass die elektrisch leitfähige Schicht oder Schichten in der Mittel-Schicht ausreichend dünn sind.
- Ferner kann das erfindungsgemäße Bauelement einen zusätzlichen Feldeffekttransistor, welcher über dem Feldeffekttransistor angeordnet ist, aufweisen.
- 30 Dies bedeutet, dass mehrere Feldeffekttransistoren in der beschriebenen Weise übereinander angeordnet werden können, und dies in im Prinzip beliebig vielen Schichten. Dadurch erhält man eine vertikale Stapelschicht von Feldeffekttransistoren, wodurch komplexere Schaltungen wie beispielsweise Logikgatter in vertikaler Integration
- 35 ausgebildet werden können. Es ist anzumerken, dass die Verdrahtung des erfindungsgemäßen Bauelements in mehreren

übereinander angeordneten Schichten nicht auf die Anwendung eines Feldeffekttransistors beschränkt ist. Es können Bauelemente gemäß unterschiedlichen Ausgestaltungen der Erfindung übereinander angeordnet werden, um komplexere Schaltkreise aufzubauen. Dadurch ist eine dreidimensionale Anordnung der Bauelemente realisiert und die Integrationsdichte von Bauelementen, bezogen auf die Oberfläche eines Substrats erhöht.

- 10 Hinsichtlich der Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Bauelements als Feldeffekttransistor ist ferner anzumerken, dass kritische Parameter, wie beispielsweise die Gate-Länge eines derartigen Feldeffekttransistors erfindungsgemäß nicht mittels einer Strukturierungs-, sondern mittels eines
- 15 Abscheideprozesses definiert werden. Mit einem Abscheideprozess ist eine wesentlich höhere strukturelle Genauigkeit erreichbar als mit einem Strukturierungsprozess. Beispielsweise kann unter Verwendung des ALD-Verfahrens ("atomic layer deposition") die Dicke einer abgeschiedenen
- 20 Schicht bis auf die Dimension einer Atomlage, d.h. bis auf wenige Angström Genauigkeit, eingestellt werden.

Der Feldeffekttransistor und der zusätzliche Feldeffekttransistor des erfindungsgemäßen Bauelements können miteinander als Inverter-Schaltkreis verschaltet sein.

- In einem solchen Fall sind der Feldeffekttransistor und der zusätzliche Feldeffekttransistor als Transistoren mit unterschiedlichem Leitungstyp ausgebildet, beispielsweise der
- 30 Feldeffekttransistor als Transistor des p-Leitungstyps und der zusätzliche Feldeffekttransistor als Transistor des n-Leitungstyps oder vice versa.

- Die erste und/oder die zweite elektrisch leitfähige Schicht des Bauelements kann Tantal, Tantalnitrid (TaN), Titan, Titannitrid (TiN), Molybdän (Mo), Aluminium (Al) und/oder ein
- 35

ferromagnetisches Material aufweisen, bzw. kann ein beliebiger Schichtstapel aus einer Kombination der angegebenen Materialien sein

- 5 Insbesondere ist zu betonen, dass bei einer Ausgestaltung der ersten und/oder der zweiten elektrisch leitfähigen Schicht aus ferromagnetischem Material wie beispielsweise Eisen, Kobalt oder Nickel bzw. aus einer geeigneten ferromagnetischen Legierung, insbesondere aus einem
- 10 hartmagnetischen oder einem weichmagnetischen Material, das Bauelement für Anwendungen in der "Spintronic" verwendet werden kann. In dem technologischen Gebiet der Spintronic wird die Halbleitertechnologie mit magnetischen Effekten kombiniert. Mit anderen Worten werden bei der Spintronic
- 15 neben der Elektronenladung beim Stromtransport zusätzlich oder alternativ der Spin des Elektrons verwendet. Anwendungen in der Spintronic sind erfindungsgemäß besonders dann vorteilhaft, wenn die Nanostruktur als Kohlenstoffnanoröhre ausgestaltet ist, da der Ladungstransport durch eine
- 20 Kohlenstoffnanoröhre über ausreichend große Dimensionen Spin-erhaltend ist, d.h. ohne einen Spin-Flip erfolgt. Als mögliches Anwendungsgebiet des erfindungsgemäßen Bauelements mit ferromagnetischen ersten und zweiten elektrisch leitfähigen Schichten kommt beispielsweise eine MRAM-Speicherzelle ("magnetic random access memory") in Betracht.
- 25 Zu diesem Zweck ist es oft vorteilhaft, entweder die erste oder die zweite elektrisch leitfähige Schicht aus einem hartmagnetischem ferromagnetischem Material und die jeweils andere Schicht aus einem weichmagnetischem ferromagnetischem
- 30 Material auszubilden.

In der Ausgestaltung des erfindungsgemäßen vertikal integrierten Bauelements als Feldeffekttransistor kann dieser beispielsweise als Schalttransistor einer DRAM-Speicherzelle

35 eingerichtet sein, wobei dann ein weiterer Stapelkondensator auszubilden ist. Auch ist eine Speicherzelle realisierbar,

bei der die Gate-isolierende Schicht des Feldeffekttransistors als Ladungsspeicherschicht (z.B. als ONO-Schicht) ausgeführt ist, wobei das Einspeichern und Löschen von Information in diesem Fall mittels Injizierens von Elektronen oder Löchern in die Ladungsspeicherschicht erfolgt.

Vorzugsweise weist die dritte und/oder die zusätzliche elektrisch leitfähige Schicht Polysilizium, Tantal, Titan, Niob und/oder Aluminium auf.

Das dielektrische Material der Mittel-Schicht kann eines oder eine Kombination der Materialien Siliziumdioxid ( $\text{SiO}_2$ ), Siliziumnitrid ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) oder mit Kalium-Ionen dotiertes Siliziumdioxid sein.

Mit Kalium-Ionen dotiertes Siliziumdioxid weist insbesondere den Vorteil auf, das Kalium-Ionen aus einer derartigen dielektrischen Schicht mittels Erwärmens ausgetrieben werden können und daher als Dotierstoff eines umgebenden Materials dienen können.

Die Nanostruktur kann eine Nanoröhre, ein Bündel von Nanoröhren oder ein Nanostäbchen (auch Nanodraht genannt) sein.

Insbesondere kann die Nanostruktur halbleitend sein.

Insbesondere kann das Nanostäbchen Silizium, Germanium, Indiumphosphid, Galliumnitrid, Galliumarsenid, Zirkoniumoxid und/oder ein Metall aufweisen.

Die Nanoröhre kann eine Kohlenstoffnanoröhre, eine Kohlenstoff-Bor-Nanoröhre, eine Kohlenstoff-Stickstoff-Nanoröhre, eine Kohlenstoff-Bor-Stickstoff-Nanoröhre, eine Wolframsulfid-Nanoröhre oder eine Chalkogenid-Nanoröhre sein.

In dem Fall, in dem die Nanostruktur eine Kohlenstoffnanoröhre ist, kann als Katalysatormaterial Eisen, Kobalt und/oder Nickel verwendet werden. In einem Fall, in dem die Nanostruktur ein Galliumarsenid-Nanostäbchen ist, wird als Katalysatormaterial vorzugsweise Gold verwendet.

Derjenige Teilbereich des Durchgangslochs, der von der Nanostruktur frei ist, kann zumindest teilweise mit einer elektrisch isolierenden Abstandshalter-Struktur gefüllt sein.

In einem solchen Fall ist sichergestellt, dass die Nanostruktur in dem Durchgangsloch vor einer mechanischen oder elektrischen Schädigung geschützt ist.

Das Bauelement kann ausschließlich aus dielektrischem Material, metallischem Material und dem Material der Nanostruktur gebildet sein. Ferner kann das Bauelement auf und/oder in einem Substrat aus polykristallinem oder amorphem Material gebildet sein.

Mit anderen Worten kann das erfindungsgemäße Bauelement nur aus elektrisch leitfähigem Material, dielektrischem Material und Material der Nanostruktur (vorzugsweise eine Kohlenstoffnanoröhre) bestehen. In diesem Fall kann das Bauelement ohne kostenintensive halbleitertechnologische Verfahren hergestellt werden. Ein weiterer wichtiger Vorteil in diesem Zusammenhang ist, dass ein polykristallines oder amorphes Material, das heißt ein nicht-einkristallines Material als Substrat verwendet werden kann, um das Bauelement herzustellen. Somit ist bei der Herstellung des Bauelements ein teures, einkristallines Substrat (beispielsweise ein Silizium-Wafer) vermieden. Es kann erfindungsgemäß im Prinzip ein beliebiges Ausgangs-Substrat verwendet werden (z.B. Glas).

Es ist anzumerken, dass die Ausgestaltungen, die oben  
bezugnehmend auf das erfindungsgemäße Bauelement beschrieben  
sind, auch für die erfindungsgemäße Bauelement-Anordnung bzw.  
für das Verfahren zum Herstellen eines vertikal integrierten  
5 Bauelements gelten.

Ferner kann bei dem Verfahren zum Herstellen eines vertikal  
integrierten Bauelements auf einer, optional bereits  
strukturierten, elektrisch leitfähigen Schicht (insbesondere  
10 einer Metall-Schicht, beispielsweise eine Tantal-,  
Tantalnitrid-, Titan- oder Titannitrid-Schicht) die Mittel-  
Schicht, welche dielektrische Teilschichten und zusätzliche  
leitfähige Schichten (beispielsweise aus Polysilizium,  
Tantal, Titan, Niob, Aluminium) aufweisen kann, abgeschieden  
15 werden. Unter Verwendung eines Lithographie- und eines  
Ätzverfahrens kann dann ein vertikales Durchgangsloch mit  
einem typischen Durchmesser zwischen 0.4nm und 100nm und mit  
einer typischen Länge von zwischen 0.01µm und 3µm in die  
Mittel-Schicht eingebracht werden kann. Bei diesem  
20 Verfahrensschritt werden die dielektrischen und elektrisch  
leitfähigen Teilschichten der Mittel-Schicht strukturiert. Es  
ist anzumerken, dass die laterale Ausdehnung des  
Durchgangslochs weiter verringert werden kann, indem die  
Maske sublithographisch verengt wird. Die mit dem  
Durchgangsloch durchsetzte dritte elektrisch leitfähige  
Schicht wird im Weiteren entlang des Umfang des  
Durchgangslochs oxidiert, beispielsweise kann eine aus  
Polysilizium-Material hergestellte dritte elektrisch  
leitfähige Schicht oxidiert werden, so dass elektrisch  
30 isolierendes Siliziumdioxid-Material in einem  
Umgebungsbereich des Durchgangslochs in der dritten  
elektrisch leitfähigen Schicht ausgebildet wird, welches  
Siliziumdioxid-Material als Gate-isolierende Schicht  
verwendbar ist.

Gemäß einer alternativen Ausgestaltung der Erfindung wird eine ringförmige, Gate-isolierende Schicht unter Verwendung des CVD-Verfahrens ("chemical vapour deposition") oder des ALD-Verfahrens ("atomic layer deposition") ausgebildet, indem

5 das Durchgangsloch gleichmäßig mit einer elektrisch isolierenden Wandschicht beschichtet wird. Anschließend kann die Nanostruktur in dem Durchgangsloch ausgebildet werden, beispielsweise wird eine Kohlenstoffnanoröhre auf einem auf der ersten elektrisch leitfähigen Schicht abgeschiedenen

10 Katalysatormaterial aufgewachsen. Das Katalysatormaterial kann entweder als Schicht auf der ersten elektrisch leitfähigen Schicht abgeschieden werden oder kann nach dem Ausbilden der Gate-isolierenden Schicht unter Verwendung des "electroless deposition"-Verfahrens, auf der Oberfläche der

15 ersten elektrisch leitfähigen Schicht in dem Durchgangsloch abgeschieden werden. Nach dem Ausbilden der Nanostruktur kann ein Zwischenbereich zwischen dem Durchgangsloch und der Nanostruktur versiegelt werden, beispielsweise mittels Einbringens von Siliziumdioxid-Material in zumindest einen

20 Teil des Durchgangslochs unter Verwendung eines CVD- oder Spin-On-Verfahrens. Überschüssiges Material kann gegebenenfalls zurückgeätzt werden, um die Nanostruktur wieder freizulegen, und die zweite elektrisch leitfähige Schicht kann auf der Oberfläche der Schichtenfolge ausgebildet und gegebenenfalls strukturiert werden.

Ausführungsbeispiele der Erfindung sind in den Figuren dargestellt und werden im Weiteren näher erläutert.

30 Es zeigen:

Figur 1A eine Querschnittsansicht eines Bauelements gemäß einem ersten Ausführungsbeispiel der Erfindung,

35 Figur 1B eine vergrößerte Querschnittsansicht, aufgenommen entlang der Schnittlinie A-A aus Figur 1A, des in

Figur 1A gezeigten Bauelements gemäß dem ersten Ausführungsbeispiel der Erfindung,

Figur 2 eine Querschnittsansicht eines Bauelements gemäß einem zweiten Ausführungsbeispiel der Erfindung,

Figur 3 eine Bauelement-Anordnung gemäß einem ersten Ausführungsbeispiel der Erfindung,

Figur 4A eine Querschnittsansicht einer Bauelement-Anordnung gemäß einem zweiten Ausführungsbeispiel der Erfindung,

Figur 4B einen Ersatzschaltkreis der in Figur 4A gezeigten Bauelement-Anordnung gemäß dem zweiten Ausführungsbeispiel der Erfindung,

Figur 5 eine Querschnittsansicht eines Bauelements gemäß einem dritten Ausführungsbeispiel der Erfindung.

Gleiche oder ähnliche Komponenten in unterschiedlichen Figuren sind mit gleichen Bezugsziffern versehen.

Im Weiteren wird bezugnehmend auf Fig.1A, Fig.1B ein vertikal integriertes Bauelement 100 gemäß einem ersten Ausführungsbeispiel der Erfindung beschrieben.

Das in Fig.1A gezeigte vertikal integrierte Bauelement 100 hat eine erste elektrisch leitfähige Schicht 101, eine teilweise aus dielektrischem Material ausgebildete Mittel-Schicht 102 auf der ersten elektrisch leitfähigen Schicht 101 und eine zweite elektrisch leitfähige Schicht 103 auf der Mittel-Schicht 102. Ferner ist eine in ein in die Mittel-Schicht 102 eingebrachtes Durchgangsloch 108 integrierte Kohlenstoffnanoröhre 104 vorgesehen, die einen ersten, mit der elektrisch leitfähigen Schicht 101 gekoppelten

Endabschnitt 104a und einen zweiten, mit der zweiten elektrisch leitfähigen Schicht 103 gekoppelten Endabschnitt 104b aufweist.

5 Zwischen der ersten leitfähigen Schicht 101 und der Kohlenstoffnanoröhre 104 ist Katalysatormaterial 107 zum Katalysieren des Ausbildens der Kohlenstoffnanoröhre 104 angeordnet.

10 Die Mittel-Schicht 102 ist in zwei übereinander angeordnete dielektrische Teilschichten 102a, 102b aufgeteilt. Zwischen der ersten Mittel-Teilschicht 102a und der zweiten Mittel-Teilschicht 102b ist eine dritte elektrisch leitfähige Schicht 105 angeordnet, deren Dicke wesentlich geringer ist  
15 als die Dicke von beiden dielektrischen Teilschichten 102a, 102b.

Die erste elektrisch leitfähige Schicht 101 und die zweite elektrisch leitfähige Schicht 103 sind aus Tantalnitrid  
20 hergestellt, die dritte elektrisch leitfähige Schicht 105 ist aus Polysilizium hergestellt, das dielektrische Material der Mittel-Schicht 102 ist Siliziumdioxid oder Kalium-Ionen aufweisendes Siliziumdioxid. Bei dem vertikal integrierten Bauelement 100 ist die Nanostruktur eine Kohlenstoffnanoröhre 104 und das Katalysatormaterial 107 ist eine Legierung aus Eisen, Kobalt und Nickel. Es ist bekannt, dass diese Materialkombination eine vorteilhafte katalytische Wirkung auf das Ausbilden einer Kohlenstoffnanoröhre hat.

30 Das vertikal integrierte Bauelement 100 ist als Feldeffekttransistor ausgebildet, bei welchem Bauelement 100 der erste Endabschnitt 104a der Kohlenstoffnanoröhre 104 als erster Source-/Drain-Bereich und der zweite Endabschnitt 104b der Kohlenstoffnanoröhre 104 als zweiter Source-/Drain-  
35 Bereich dient, und wobei in der dritten elektrisch leitfähigen Schicht 105, die als Gate-Elektrode des

Feldeffekttransistors dient, entlang des darin eingebrachten Durchgangslochs 108 eine Ringstruktur 106 aus einem elektrisch isolierenden Material als Gate-isolierender Bereich des Feldtransistors angeordnet ist.

5

Das in Fig.1A gezeigte vertikal integrierte Bauelement 100 erfüllt die Funktionalität eines Feldeffekttransistors. Die Leitfähigkeit der Kohlenstoffnanoröhre 104 kann charakteristisch beeinflusst werden, indem an die dritte elektrisch leitfähige Schicht 105, welche die Funktionalität einer Gate-Elektrode aufweist, eine geeignete elektrische Spannung angelegt wird. Mittels einer solchen elektrischen Spannung kann die Leitfähigkeit der Kohlenstoffnanoröhre 104 in einem räumlich scharf definierten Mitten-Bereich 104c charakteristisch beeinflusst werden. Der Mitten-Bereich 104c fungiert anschaulich als Kanal-Bereich.

10

15

20

Da die dritte elektrisch leitfähige Schicht 105 erfindungsgemäß ausreichend dünn vorgesehen ist, bildet sich bei Anlegen einer elektrischen Spannung an die dritte elektrisch leitfähige Schicht 105 aufgrund eines elektrostatischen Spitzeneffekts in einem angrenzenden Umgebungsbereich der Kohlenstoffnanoröhre 104 ein besonders starkes elektrisches Feld aus. Mittels des Feldeffekts ist die elektrische Leitfähigkeit der Kohlenstoffnanoröhre 104 in dem an die dritte elektrisch leitfähige Schicht 105 angrenzenden Mitten-Bereich 104c sehr genau steuerbar.

30

In Fig.1B ist eine vergrößerte Querschnittsansicht, aufgenommen entlang der Schnittlinie A-A aus Fig.1A, des vertikal integrierten Bauelements 100 aus Fig.1A gezeigt.

35

Aus Fig.1B ist ersichtlich, dass in dem Durchgangsloch 108 die Kohlenstoffnanoröhre 104 enthalten ist. Die halbleitende Kohlenstoffnanoröhre 104 ist mittels der elektrisch isolierenden Ringstruktur 106 von der dritten elektrisch

leitfähigen Schicht 105 entkoppelt. Die Stärke eines elektrischen Stromflusses zwischen den als Source-/Drain-Anschlüssen fungierenden ersten und zweiten elektrisch leitfähigen Schichten 101, 103 ist davon abhängig, ob an die Gate-Elektrode 105 eine elektrische Spannung angelegt ist oder nicht. Daher erfüllt das vertikal integrierte Bauelement 100 die Funktion eines Feldeffekttransistors.

Im Weiteren wird ein Verfahren zum Herstellen des vertikal integrierten Bauelements 100 gemäß einem bevorzugten Ausführungsbeispiel der Erfindung beschrieben (nicht gezeigt in den Figuren).

Zunächst wird die erste elektrisch leitfähige Schicht 101 mittels Aufbringens von Titannitrid, beispielsweise unter Verwendung eines CVD-Verfahrens ("chemical vapour deposition") ausgebildet. In einem nächsten Teilschritt wird eine erste Mittel-Teilschicht 102a mittels Abscheidens von Siliziumdioxid-Material ausgebildet. Auf der ersten Mittel-Teilschicht 102a wird die dritte elektrisch leitfähige Schicht 105 mittels Abscheidens von Polysilizium-Material ausgebildet. Dies kann wieder unter Verwendung eines CVD-Verfahrens erfolgen. Auf der dritten elektrisch leitfähigen Schicht 105 wird die zweite Mittel-Teilschicht 102b mittels Absetzens von Siliziumdioxid ausgebildet. Sowohl das Siliziumdioxid-Material der ersten Mittel-Teilschicht 102a als auch das Siliziumdioxid-Material der zweiten Mittel-Teilschicht 102b kann gemäß einem modifizierten TEOS-Verfahren ("Tetra-Ethyl-Ortho-Silicat") ausgebildet werden, derart, dass die Mittel-Teilschichten 102a, 102b jeweils Kalium-Dotieratome aufweisen können. Mittels Durchführens der zuvor beschriebenen Verfahrensschritte wird die zumindest teilweise auf dielektrischem Material ausgebildete Mittel-Schicht 102 ausgebildet. In die Mittel-Schicht 102 wird das Durchgangsloch 108 eingebracht. Dies erfolgt unter Verwendung eines Lithographie- und eines Ätz-Verfahrens. Das Ätz-

Verfahren ist vorzugsweise derart gewählt (insbesondere mittels Vorgebens des Ätzmittels), dass der Ätztvorgang an der elektrisch leitfähigen Schicht 101 stoppt. Mittels thermischen Oxidierens der dritten elektrisch leitfähigen Schicht 105 aus Polysilizium-Material wird die elektrisch isolierende Ringstruktur 106 aus Siliziumdioxid ausgebildet. Diese wird mit einer Dicke ausgebildet, die einer typischen Dicke einer Gateoxid-Schicht in einem MOSFET entspricht, beispielsweise 10nm. In einem weiteren Verfahrensschritt wird das Katalysatormaterial 107 aus Eisen, Kobalt und Nickel in dem Durchgangsloch 108 und auf der ersten elektrisch leitfähigen Schicht 101 abgeschieden. Dies kann unter Verwendung eines Aufdampf-, Sputter-, electro- oder electroless-deposition-Verfahrens realisiert werden. Gemäß dem "electroless-deposition"-Verfahren wird ein leitfähiges Material autokatalytisch aus einer das abzuscheidende Material aufweisenden Lösung ohne Anlegen eines elektrischen Stromes auf bestimmten Oberflächen-Bereichen einer Schichtenfolge abgeschieden. Anschließend wird die Kohlenstoffnanoröhre 104 in dem Durchgangsloch 108 aufgewachsen, wobei der erste Endabschnitt 104a mit der ersten leitfähigen Struktur 101 gekoppelt wird. Das Ausbilden einer Kohlenstoffnanoröhre erfolgt unter Verwendung eines CVD-Verfahrens, bei dem ein Methan/Wasserstoffgemisch als Kohlenstoffquelle in die Verfahrenskammer eingeleitet wird. Auf diese Weise entsteht häufig eine p-dotierte Kohlenstoffnanoröhre 104. Wahlweise können mittels Temperns die eventuell eingebrachten Kaliumionen aus der ersten Mittel-Teilschicht 102a und der zweiten Mittel-Teilschicht 102b ausgetrieben werden, diese Kalium-Ionen diffundieren in die zuvor p-dotierte Kohlenstoffnanoröhre 104 ein und wirken als n-Dotierstoff. Dadurch wird die zunächst p-dotierte Kohlenstoffnanoröhre 104 in eine Kohlenstoffnanoröhre 104 des n-Leitungstyps umgewandelt. Ferner wird die zweite elektrisch leitfähige Schicht 103 auf der Mittel-Schicht 102 ausgebildet und mit dem zweiten Endabschnitt 104b der

Kohlenstoffnanoröhre 104 gekoppelt, wodurch das in Fig.1A, Fig.1B gezeigte vertikal integrierte Bauelement 100 erhalten wird.

5 Im Weiteren wird bezugnehmend auf Fig.2 ein als Feldeffekttransistor ausgestaltetes, vertikal integriertes Bauelement 200 beschrieben. Im Weiteren werden lediglich die Unterschiede zwischen dem vertikal integrierten Bauelement 200 und dem vertikal integrierten Bauelement 100 beschrieben.

10

Der Unterschied zwischen dem vertikal integrierten Bauelement 200 und dem vertikal integrierten Bauelement 100 ist, dass im Fall des vertikal integrierten Bauelements 200 die elektrisch isolierende Ringstruktur 106 aus Fig.1A nicht vorgesehen ist.

15

Stattdessen ist das Durchgangsloch 108 des vertikal integrierten Bauelements 200 mit einer durchgehenden elektrisch isolierenden Randbeschichtung 201 versehen, welche die Funktionalität einer Gate-isolierenden Schicht wahrnimmt. Mit anderen Worten erfüllt das vertikal integrierte

20

Bauelement 200 aus Fig.2 die Funktion eines Feldeffekttransistors, wobei die Leitfähigkeit der Kohlenstoffnanoröhre 104 mittels Anlegens einer elektrischen Spannung an die dritte elektrisch leitfähige Schicht 105 gesteuert wird. Dies erfolgt unter Verwendung des Feldeffekts, für den ein den Mitten-Bereich 104c der Kohlenstoffnanoröhre 104 umgebender Teilbereich der elektrisch isolierenden Randbeschichtung 201 wesentlich ist.

30

Um das vertikal integrierte Bauelement 200 herzustellen, wird abweichend von dem Herstellungsverfahren zum Herstellen des vertikal integrierten Bauelements 100 vor dem Aufwachsen der Kohlenstoffnanoröhre 104 in dem Durchgangsloch 108 das Durchgangsloch 108 unter Verwendung des CVD-Verfahrens gleichmäßig mit einem elektrisch isolierenden Material  
35 beschichtet, wodurch die elektrisch isolierende Randbeschichtung 201 ausgebildet wird. Diese kann zusätzlich

die Funktion eines Abstandshalters bzw. einer Führung für die Kohlenstoffnanoröhre 104 erfüllen.

Im Weiteren wird bezugnehmend auf Fig.3 eine Bauelement-  
5 Anordnung 300 gemäß einem ersten Ausführungsbeispiel der Erfindung beschrieben.

Wie in Fig.3 gezeigt, weist die Bauelement-Anordnung 300 zwei  
10 übereinander angeordnete Bauelemente auf, von denen jedes ähnlich wie das vertikal integrierte Bauelement 100 ausgebildet ist. Anschaulich weist die Bauelement-Anordnung 300 einen Feldeffekttransistor, gebildet von dem vertikal integrierten Bauelement 100, auf, welcher über einem anderen Feldeffekttransistor angeordnet ist.

15 Der zusätzliche Feldeffekttransistor, der unterhalb des vertikal integrierten Bauelements 100 angeordnet ist, weist eine gemeinsame elektrisch leitfähige Schicht 301 gemeinsam mit dem vertikal integrierten Bauelement 100 auf, mit anderen  
20 Worten ist bei der Bauelement-Anordnung 300 die erste elektrisch leitfähige Schicht 101 aus Fig.1A und die obere elektrisch leitfähige Schicht des darunterliegenden Feldeffekttransistors als gemeinsame Schicht ausgebildet.

Der in der Bauelement-Anordnung 300 verglichen mit dem vertikal integrierten Bauelement 100 zusätzlich vorgesehene Feldeffekttransistor weist eine zusätzliche erste elektrisch leitfähige Schicht 303 auf, auf der eine zusätzliche Mittel-  
30 Schicht 302 ausgebildet ist. Diese ist aus einer ersten Mittel-Teilschicht 302a, einer zweiten Mittel-Teilschicht 302b und einer zusätzlichen dritten elektrisch leitfähigen Schicht 305 gebildet, die zwischen den Mittel-Teilschichten 302a, 302b angeordnet ist. Die erste Mittel-Teilschicht 302a und die zweite Mittel-Teilschicht 302b der zusätzlichen  
35 Mittel-Schicht 302 sind aus Siliziumdioxid-Material hergestellt. Die zusätzliche dritte elektrisch leitfähige

Schicht 305 ist ausgebildet wie die elektrisch leitfähige Schicht 105. Ferner ist von einem zusätzlichen Durchgangsloch 308 des gemäß Fig.3 unteren Bereichs der Bauelement-Anordnung 300 in einem Bereich, in dem das Durchgangsloch 308 die  
5 zusätzliche dritte elektrisch leitfähige Schicht 305 durchstößt, eine zusätzliche elektrisch isolierende Ringstruktur 306 angeordnet. Auf zusätzlichem Katalysatormaterial 307 ist eine zusätzliche Kohlenstoffnanoröhre 304 aufgewachsen, deren gemäß Fig.3  
10 unterer Endabschnitt 304a mit dem zusätzlichen Katalysatormaterial 307 gekoppelt ist, und deren oberer Endabschnitt 304b mit der gemeinsamen elektrisch leitfähigen Schicht 301 gekoppelt ist.

15 Anschaulich ist die Nanostruktur bei der Bauelement-Anordnung 300 aus der Kohlenstoffnanoröhre 104 und der zusätzlichen Kohlenstoffnanoröhre 304 gebildet. Teilbereiche der Nanostruktur, nämlich die Kohlenstoffnanoröhre 104 einerseits und die zusätzliche Kohlenstoffnanoröhre 304 andererseits,  
20 weisen eine unterschiedliche elektrische Leitfähigkeit auf. Die Kohlenstoffnanoröhre 104 der Nanostruktur ist (wie oben beschrieben) mit Ladungsträgern des n-Leitungstyps dotiert, und die zusätzliche Kohlenstoffnanoröhre 304 der Nanostruktur ist mit Ladungsträgern des p-Leitungstyps dotiert. Die unterschiedliche Dotierung der Kohlenstoffnanoröhren 104, 304  
beruht darauf, dass die Kohlenstoffnanoröhre 104 von mit Kalium-Ionen dotiertem Siliziumdioxid-Material 102a, 102b umgeben ist, wohingegen die zusätzliche Kohlenstoffnanoröhre 304 von reinem Siliziumdioxid-Material 302a, 302b umgeben  
30 ist. Beim Tempern der Schichtenfolge wird das Kalium-Material aus den Schichten 102a, 102b ausgetrieben und diffundiert in die Kohlenstoffnanoröhre 104 ein, die dadurch n-dotiert wird. Bei der Kohlenstoffnanoröhre 304 erfolgt eine solche Umdotierung nicht, da das sie umgebende Material 302a, 302b  
35 von Kalium-Dotierstoff frei ist. Dadurch verbleibt die zusätzliche Kohlenstoffnanoröhre 304 in dem p-dotierten

Zustand, in welchem sie bei dem CVD-Aufwachsen erhalten wurde. Anders ausgedrückt erfüllt der gemäß Fig.3 obere Feldeffekttransistor der Bauelement-Anordnung 300 die Funktionalität eines n-MOSFETs, wohingegen der gemäß Fig.3 untere Feldeffekttransistor der Bauelement-Anordnung 300 die Funktionalität eines p-MOSFETs erfüllt.

Die Bauelement-Anordnung 300 wird hergestellt, indem zunächst der gemäß Fig.3 untere Feldeffekttransistor ausgebildet wird, analog wie oben bezugnehmend auf Fig.1A beschrieben.

Abweichend von dem Herstellungsverfahren zum Herstellen des vertikal integrierten Bauelements 100 aus Fig.1A werden allerdings beim Herstellen der Bauelement-Anordnung 300 aus Fig.3 die erste Mittel-Teilschicht 302a und die zweite

Mittel-Teilschicht 302b jeweils aus reinem, von Kalium-Dotieratomen freiem Siliziumdioxid hergestellt. Dadurch ist der untere Feldeffekttransistor der Bauelement-Anordnung 300 geschaffen, der die zusätzliche Kohlenstoffnanoröhre 304 des p-Leitungstyps aufweist. Auf dieser Schichtenfolge wird im

Weiteren ein vertikal integriertes Bauelement 100, wie es in Fig.1A gezeigt ist, hergestellt. Dabei ist zu beachten, dass die gemeinsame elektrisch leitfähige Schicht 301 sowohl den gemäß Fig.3 oberen Source-/Drain-Anschluss des gemäß Fig.3 unteren Feldeffekttransistors, als auch den gemäß Fig.3 unteren Source-/Drain-Anschluss des gemäß Fig.3 oberen Feldeffekttransistors ausbildet. Sowohl die erste Mittel-Teilschicht 102a als auch die zweite Mittel-Teilschicht 102b wird gemäß dem beschriebenen Ausführungsbeispiel aus mit Kalium-Material dotiertem Siliziumdioxid-Material

hergestellt, so dass die bei dem CVD-Herstellungsverfahren als p-dotierte Kohlenstoffnanoröhre erhaltene Kohlenstoffnanoröhre 104 nach dem oben beschriebenen Tempern n-dotiert ist.

Zusammenfassend ist mit der Bauelement-Anordnung 300 ein n-MOS-Transistor auf einem p-MOS-Transistor bereitgestellt,

daher kann die Bauelement-Anordnung 300 als CMOS-Bauelement verwendet werden. Bei der CMOS-Technologie ("complementary metal oxide semiconductor") werden wechselweise arbeitende n-Kanal und p-Kanal MOSFETs als Schalter verwendet. CMOS-Bauelemente werden in vielen hochintegrierten Schaltkreisen verwendet, zum Beispiel sind viele moderne Mikroprozessoren in dieser Technologie aufgebaut.

Im Weiteren wird bezugnehmend auf Fig.4A, Fig.4B eine Bauelement-Anordnung 400 gemäß einem zweiten Ausführungsbeispiel der Erfindung beschrieben.

Bei der Bauelement-Anordnung 400 sind ein p-MOS-Feldeffekt-Transistor 401, gebildet von der gemäß Fig.4A unteren Schichtenfolge und ein n-MOS-Feldtransistor 402, gebildet von der gemäß Fig.4A oberen Schichtenfolge der Bauelement-Anordnung 400 miteinander als Inverter-Schaltkreis verschaltet.

Im Weiteren wird Aufbau und Funktionalität dieses CMOS-Inverters beschrieben. Wie in Fig.4A gezeigt, ist an die zweite elektrisch leitfähige Schicht 103 des n-MOS-Feldeffekttransistors 402 das elektrische Massepotential  $V_{ss}$  403 angelegt. Ferner ist an die zusätzliche erste elektrisch leitfähige Schicht 303 des p-MOS-Feldeffekttransistors 401 das elektrische Potential einer Versorgungsspannung  $V_{dd}$  404 angelegt. Darüber hinaus sind die dritte elektrisch leitfähige Schicht 105 und die zusätzliche dritte elektrisch leitfähige Schicht 305 mit einem Eingang 405 des CMOS-Inverters gekoppelt. Die gemeinsame elektrisch leitfähige Schicht 301 ist mit einem Ausgang 406 des CMOS-Inverters gekoppelt.

In Fig.4B ist ein Ersatzschaltkreis 410 der Bauelement-Anordnung 400 gezeigt, welche Bauelement-Anordnung 400 als CMOS-Inverter verschaltet ist. Der Eingang 405 ist mit den

Gate-Bereichen des p-MOS-Feldeffekttransistors 401 und des n-MOS-Feldeffekttransistors 402 gekoppelt, das heißt mit den als jeweilige Gate-Elektrode fungierenden Komponenten der Bauelement-Anordnung 400, nämlich mit der dritten elektrisch leitfähigen Schicht 105 und mit der zusätzlichen dritten elektrisch leitfähigen Schicht 305. Die zweite elektrisch leitfähige Schicht 103 des n-MOS-Feldeffekttransistors 402 dient als erster Source-/Drain-Anschluss des n-MOS-Feldeffekttransistors 402, und an die erste elektrisch leitfähige Schicht 103 ist daher das elektrische Massepotential  $V_{ss}$  403 angelegt. Ferner ist ein zweiter Source-/Drain-Anschluss des n-MOS-Feldeffekttransistors 402 und ein erster Source-/Drain-Anschluss des p-MOS-Feldeffekttransistors 401 gemeinsam als gemeinsame elektrisch leitfähige Schicht 301 ausgebildet und mit dem Ausgang 406 der als CMOS-Inverter verschalteten Bauelement-Anordnung 410 gekoppelt. Ein zweiter Source-/Drain-Anschluss des p-MOS-Feldeffekttransistors 401 ist von der zusätzlichen elektrisch leitfähigen Schicht 303 gebildet, an welche das elektrische Potential der Versorgungsspannung  $V_{dd}$  404 angelegt ist.

Wird an den Eingang 405 ein elektrisches Potential mit einem logischen Wert "1" angelegt, so ist der n-MOS-Feldeffekttransistors 402 leitend, wohingegen der p-MOS-Feldeffekttransistors 402 nichtleitend ist. Daher ist der Ausgang 406 mit dem elektrischen Massepotential  $V_{ss}$  403 gekoppelt. Daher liegt in diesem Falle an dem Ausgang 406 ein Signal mit einem logischen Wert "0". In einem anderen Fall, in dem an den Eingang 405 ein elektrisches Signal mit einem logischen Wert "0" angelegt wird, ist der n-MOS-Feldeffekttransistors 402 nichtleitend, wohingegen der p-MOS-Feldeffekttransistors 401 leitend ist. Daher ist der Ausgang 406 mit dem elektrischen Potential der Versorgungsspannung  $V_{dd}$  404 gekoppelt, so dass an dem Ausgang 406 ein elektrisches Signal mit einem logischen Wert "1" anliegt. Zusammenfassend ist festzustellen, dass gemäß der

Funktionalität des CMOS-Inverters an dem Ausgang 406 jeweils das zu dem an dem Eingang 405 bereitgestellten Signal inverse Signal anliegt.

- 5 Im Weiteren wird bezugnehmend auf Fig.5 ein vertikal integriertes Bauelement 500 gemäß einem dritten bevorzugten Ausführungsbeispiel der Erfindung beschrieben.

10 Ein Unterschied zwischen dem vertikal integrierten Bauelement 500 und dem vertikal integrierten Bauelement 100 besteht darin, dass die Mittel-Schicht anders aufgebaut ist. Die Mitten-Schicht 501 des vertikal integrierten Bauelements 500 weist zusätzlich zu der ersten Mittel-Teilschicht 102a aus Kalium-dotiertem Siliziumdioxid, der zweiten Mittel-  
15 Teilschicht 102b aus Kalium-dotiertem Siliziumdioxid, der dritten elektrisch leitfähigen Schicht 105 aus Polysilizium und der elektrisch isolierenden Ringstruktur 106 eine dritte Mittel-Teilschicht 501a aus Siliziumnitrid auf, welche zwischen der dritten elektrisch leitfähigen Schicht 105 und  
20 einer vierten elektrisch leitfähigen Schicht 502 angeordnet ist. In einem Grenzbereich zwischen dem Durchgangsloch 108 und der vierten elektrisch leitfähigen Schicht 502 ist eine zusätzliche elektrisch isolierende Ringstruktur 503 angeordnet. Die vierte elektrisch leitfähige Schicht 502 ist aus Polysilizium-Material und die vierte elektrisch isolierende Ringstruktur 503 ist aus Siliziumdioxid-Material hergestellt.

Das vertikal integrierte Bauelement 500 stellt einen  
30 Feldeffekttransistor mit zwei Gate-Elektroden 105, 502 dar. Für bestimmte Anwendungen kann ein solcher Feldeffekttransistor mit mehreren Gate-Anschlüssen vorteilhaft sein, um die elektrische Leitfähigkeit der Kohlenstoffnanoröhre 104 an unterschiedlichen Teilbereichen  
35 zu beeinflussen oder an mehreren Teilbereichen gleichzeitig.

Zusammenfassend ist erfindungsgemäß ein vertikal integriertes Bauelement geschaffen, das wahlweise als Feldeffekttransistor, CMOS-Bauelement, Inverter und Feldeffekttransistor mit mehreren Gate-Elektroden verwendbar ist. Aus diesen Grund-Komponenten sind eine Vielzahl komplexerer Schaltkreise aufbaubar bzw. ausbildbar, beispielsweise Logikgatter und weitere komplexe Schaltkreis-Anordnungen. Die einzelnen Bauelemente der Erfindung können aufgrund der vertikalen Orientierung in beliebiger Weise übereinander ausgebildet werden, und können ferner nebeneinander ausgebildet werden.

In diesem Dokument sind folgende Veröffentlichungen zitiert:

[1] Harris, PJF (1999) "Carbon Nanotubes and Related Structures - New Materials for the Twenty-first Century.", Cambridge University Press, Cambridge. pp. 1 to 15, 111 to 155

[2] Derycke, V, Martel, R, Appenzeller, J, Avouris, P (2001) "Carbon Nanotube Inter- and Intramolecular Logic Gates", Nanoletters 1(9):453-456

[3] Johnson, JC, Yan, H, Schaller, RD, Haber, LH, Saykally, RJ, Yang, P (2001) "Single Nanowire Lasers" J.Phys.Chem. B, im Druck,  
<http://www.cchem.berkeley.edu/~pdygrp/pub.html>  
(Online, zitiert am 26. November 2001)

[4] Huang, Y, Duan, X, Cui, Y, Lauhon, LJ, Kim, KH, Lieber, CM (2001) "Logic Gates and Computation from Assembled Nanowire Building Blocks", Science 294:1313-1317

[5] DE 100 36 897 C1

## Bezugszeichenliste

- 100 Vertikal integriertes Bauelement
- 101 erste elektrisch leitfähige Schicht
- 102 Mittel-Schicht
- 102a erste Mittel-Teilschicht
- 102b zweite Mittel-Teilschicht
- 103 zweite elektrisch leitfähige Schicht
- 104 Kohlenstoffnanoröhre
- 104a erster Endabschnitt
- 104b zweiter Endabschnitt
- 104c Mitten-Bereich
- 105 dritte elektrisch leitfähige Schicht
- 106 elektrisch isolierende Ringstruktur
- 107 Katalysator-Material
- 108 Durchgangsloch
- 200 Vertikal integriertes Bauelement
- 201 elektrisch isolierende Randbeschichtung
- 300 Bauelement-Anordnung
- 301 gemeinsame elektrisch leitfähige Schicht
- 302 zusätzliche Mittel-Schicht
- 302a erste Mittel-Teilschicht
- 302b zweite Mittel-Teilschicht
- 303 zusätzliche erste elektrisch leitfähige Schicht
- 304 zusätzliche Kohlenstoffnanoröhre
- 304a erster Endabschnitt
- 304b zweiter Endabschnitt
- 304c Mitten-Bereich
- 305 zusätzliche dritte elektrisch leitfähige Schicht
- 306 zusätzliche elektrisch isolierende Ringstruktur
- 307 zusätzliches Katalysator-Material
- 308 Durchgangsloch
- 400 Bauelement-Anordnung
- 401 p-MOS Feldeffekttransistor
- 402 n-MOS Feldeffekttransistor
- 403 elektrisches Massepotential

- 404 Versorgungsspannung
- 405 Eingang
- 406 Ausgang
- 410 Ersatzschaltbild
- 500 Vertikal integriertes Bauelement
- 501 Mitten-Schicht
- 501a dritte Mittel-Teilschicht
- 502 vierte elektrisch leitfähige Schicht
- 503 zusätzliche elektrisch isolierende Ringstruktur

**Patentansprüche:****1. Vertikal integriertes Bauelement**

- mit einer ersten elektrisch leitfähigen Schicht;
- 5 • mit einer teilweise aus dielektrischem Material ,  
ausgebildeten Mittel-Schicht auf der ersten elektrisch  
leitfähigen Schicht;
- mit einer zweiten elektrisch leitfähigen Schicht auf der  
Mittel-Schicht;
- 10 • mit einer in ein in die Mittel-Schicht eingebrachtes  
Durchgangsloch integrierten Nanostruktur mit einem  
ersten, mit der ersten elektrisch leitfähigen Schicht  
gekoppelten Endabschnitt und mit einem zweiten, mit der  
zweiten elektrisch leitfähigen Schicht gekoppelten  
15 Endabschnitt;
- wobei die Mittel-Schicht zwischen zwei benachbarten  
dielektrischen Teilschichten eine dritte elektrisch  
leitfähige Schicht aufweist, deren Dicke geringer ist  
als die Dicke von zumindest einer der dielektrischen  
20 Teilschichten.

**2. Bauelement nach Anspruch 1,**

bei dem zwischen der ersten leitfähigen Schicht und der  
Nanostruktur Katalysatormaterial zum Katalysieren des  
Ausbildens der Nanostruktur angeordnet ist.

**3. Bauelement nach Anspruch 1 oder 2,**

bei dem die dritte elektrisch leitfähige Schicht die  
Nanostruktur in einem Umgebungsbereich des ersten oder des  
30 zweiten Endabschnitts umgibt.

**4. Bauelement nach einem der Ansprüche 1 bis 3,**

bei dem die Dicke der dritten elektrisch leitfähigen Schicht  
geringer ist als die Dicke von beiden dielektrischen  
35 Teilschichten.

**5. Bauelement nach einem der Ansprüche 1 bis 4,**

ausgebildet als Feldeffekttransistor, wobei

- der erste Endabschnitt der Nanostruktur einen ersten Source-/Drain-Bereich und der zweite Endabschnitt der Nanostruktur einen zweiten Source-/Drain-Bereich bildet;
- 5 • in der dritten elektrisch leitfähigen Schicht, welche die Gate-Elektrode des Feldeffekttransistors bildet, entlang des darin eingebrachten Durchgangslochs eine Ringstruktur aus einem elektrisch isolierenden Material als Gate-isolierender Bereich des Feldeffekttransistors  
10 angeordnet ist.

6. Bauelement nach Anspruch 5,  
bei dem die Mittel-Schicht eine zusätzliche elektrisch  
leitfähige Schicht aufweist, welche mindestens eine  
15 zusätzliche elektrisch leitfähige Schicht als zusätzliche Gate-Elektrode des Feldeffekttransistors dient, wobei entlang des in der zusätzlichen elektrisch leitfähigen Schicht eingebrachten Durchgangslochs eine zusätzliche Ringstruktur aus einem elektrisch isolierenden Material als zusätzlicher  
20 Gate-isolierender Bereich des Feldeffekttransistors angeordnet ist.

7. Bauelement nach Anspruch 6 oder 7  
mit einem zusätzlichen Feldeffekttransistor über dem Feldeffekttransistor.

8. Bauelement nach Anspruch 7,  
bei dem der Feldeffekttransistor und der zusätzliche Feldeffekttransistor miteinander als Inverter-Schaltkreis  
30 verschaltet sind.

9. Bauelement nach einem der Ansprüche 1 bis 8,  
bei dem die erste und/oder die zweite elektrisch leitfähige Schicht

- 35 • Tantal
- Tantalnitrid

- Titan
  - Molybdän
  - Aluminium
  - Titannitrid und/oder
  - 5 • ein ferromagnetisches Material; oder
  - einen Schichtstapel aus diesen Materialien aufweist.
10. Bauelement nach einem der Ansprüche 6 bis 9,  
10 bei dem die dritte und/oder die zusätzliche elektrisch leitfähige Schicht
- Polysilizium;
  - Tantal;
  - Titan;
  - 15 • Niob und/oder
  - Aluminium
  - aufweist.
11. Bauelement nach einem der Ansprüche 1 bis 10,  
20 bei dem das dielektrische Material der Mittel-Schicht eines oder eine Kombination der Materialien
- Siliziumdioxid
  - Siliziumnitrid oder
  - mit Kaliumionen dotiertes Siliziumdioxid
  - 25 aufweist.
12. Bauelement nach einem der Ansprüche 1 bis 11,  
bei dem die Nanostruktur
- eine Nanoröhre
  - 30 • ein Bündel von Nanoröhren oder
  - ein Nanostäbchen
  - aufweist.
13. Bauelement nach Anspruch 12,  
35 bei dem das Nanostäbchen
- Silizium

- Germanium
  - Indiumphosphid
  - Galliumnitrid
  - Galliumarsenid
  - 5 • Zirkoniumoxid und/oder
  - ein Metall
- aufweist.
14. Bauelement nach Anspruch 12,
- 10 bei dem die Nanoröhre
- eine Kohlenstoffnanoröhre
  - eine Kohlenstoff-Bor-Nanoröhre
  - eine Kohlenstoff-Stickstoff-Nanoröhre
  - eine Wolframsulfid-Nanoröhre oder eine
  - 15 • eine Chalkogenid-Nanoröhre
- ist.
15. Bauelement nach einem der Ansprüche 2 bis 14,
- bei dem die Nanostruktur eine Kohlenstoffnanoröhre ist und
- 20 bei der das Katalysatormaterial
- Eisen
  - Kobalt und/oder
  - Nickel
- aufweist.
16. Bauelement nach einem der Ansprüche 2 bis 14,
- bei dem die Nanostruktur ein Galliumarsenid-Nanostäbchen ist
- und bei dem das Katalysatormaterial Gold aufweist.
- 30 17. Bauelement nach einem der Ansprüche 1 bis 16,
- bei dem der Teilbereich des Durchgangslochs, der von der
- Nanostruktur frei ist, zumindest teilweise mit einer
- elektrisch isolierenden Abstandshalter-Struktur gefüllt ist.
- 35 18. Bauelement nach einem der Ansprüche 1 bis 17,
- das ausschließlich aus dielektrischem Material, metallischem

Material und dem Material der Nanostruktur gebildet ist.

19. Bauelement nach einem der Ansprüche 1 bis 18,  
das auf und/oder in einem Substrat aus polykristallinem oder  
5 amorphem Material gebildet ist.

20. Bauelement-Anordnung  
mit mindestens zwei nebeneinander angeordneten und/oder mit  
mindestens zwei übereinander angeordneten Bauelementen nach  
10 einem der Ansprüche 1 bis 19.

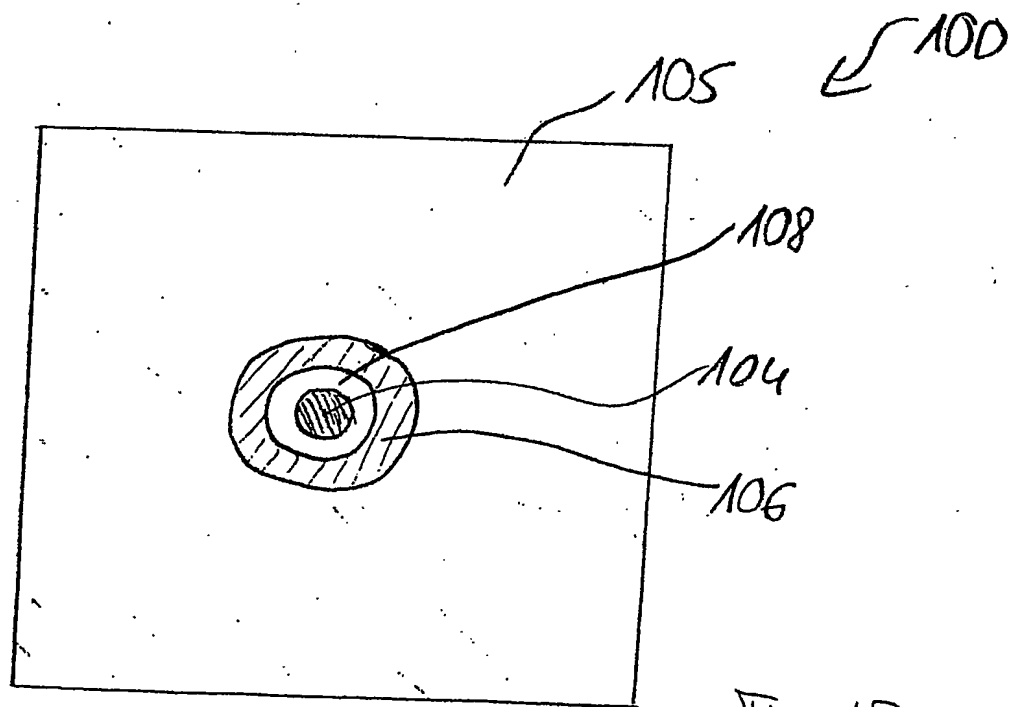
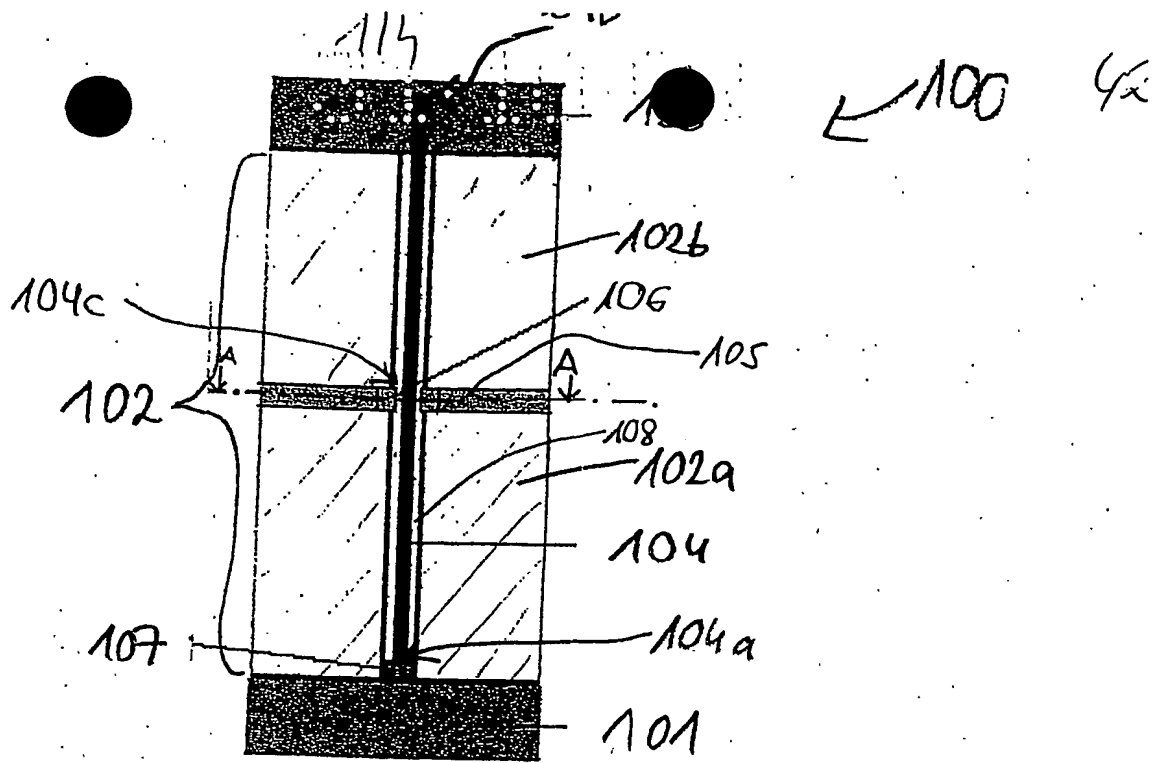
21. Verfahren zum Herstellen eines vertikal integrierten  
Bauelements, bei dem

- eine erste elektrisch leitfähige Schicht ausgebildet  
15 wird;
- eine Mittel-Schicht teilweise aus dielektrischem  
Material ausgebildet wird;
- ein Durchgangsloch in die Mittel-Schicht eingebracht  
wird;
- 20 • eine Nanostruktur mit einem ersten Endabschnitt und mit  
einem zweiten Endabschnitt in dem Durchgangsloch  
ausgebildet wird, wobei der erste Endabschnitt mit der  
ersten elektrisch leitfähigen Schicht gekoppelt wird;
- eine zweite elektrisch leitfähige Schicht auf der  
Mittel-Schicht ausgebildet und mit dem zweiten  
Endabschnitt der Nanostruktur gekoppelt wird;
- die Mittel-Schicht derart ausgebildet wird, dass  
zwischen zwei benachbarten dielektrischen Teilschichten  
eine dritte elektrisch leitfähige Schicht ausgebildet  
30 wird, deren Dicke geringer ist als die Dicke von  
zumindest einer der dielektrischen Teilschichten.

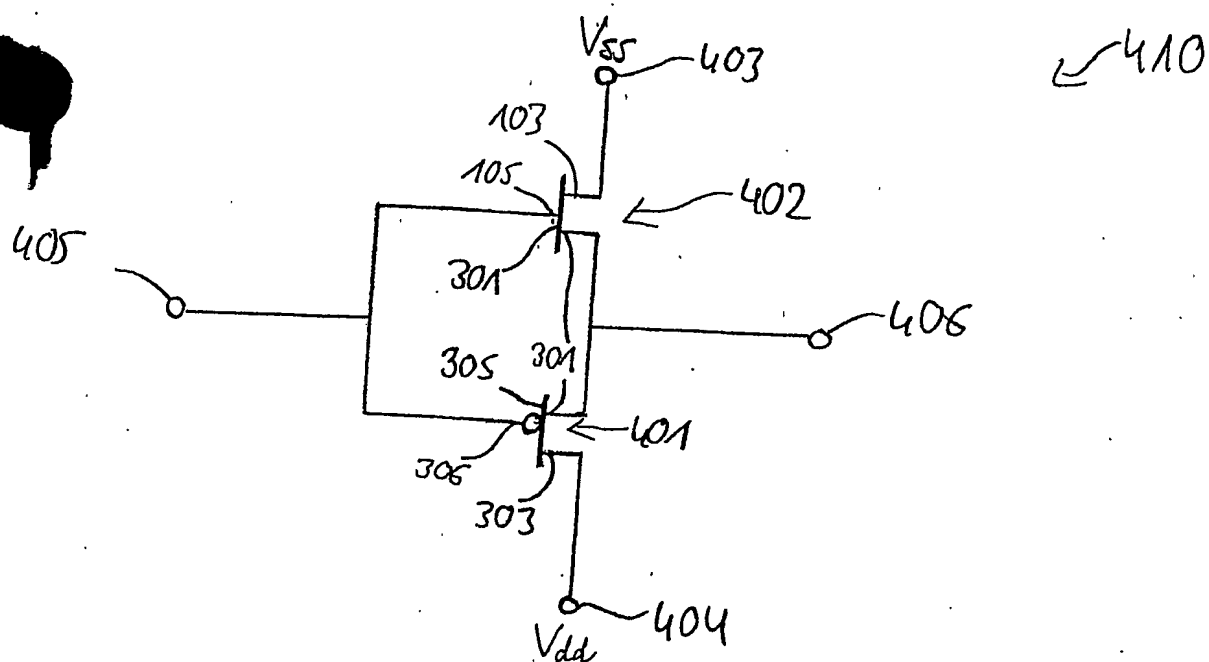
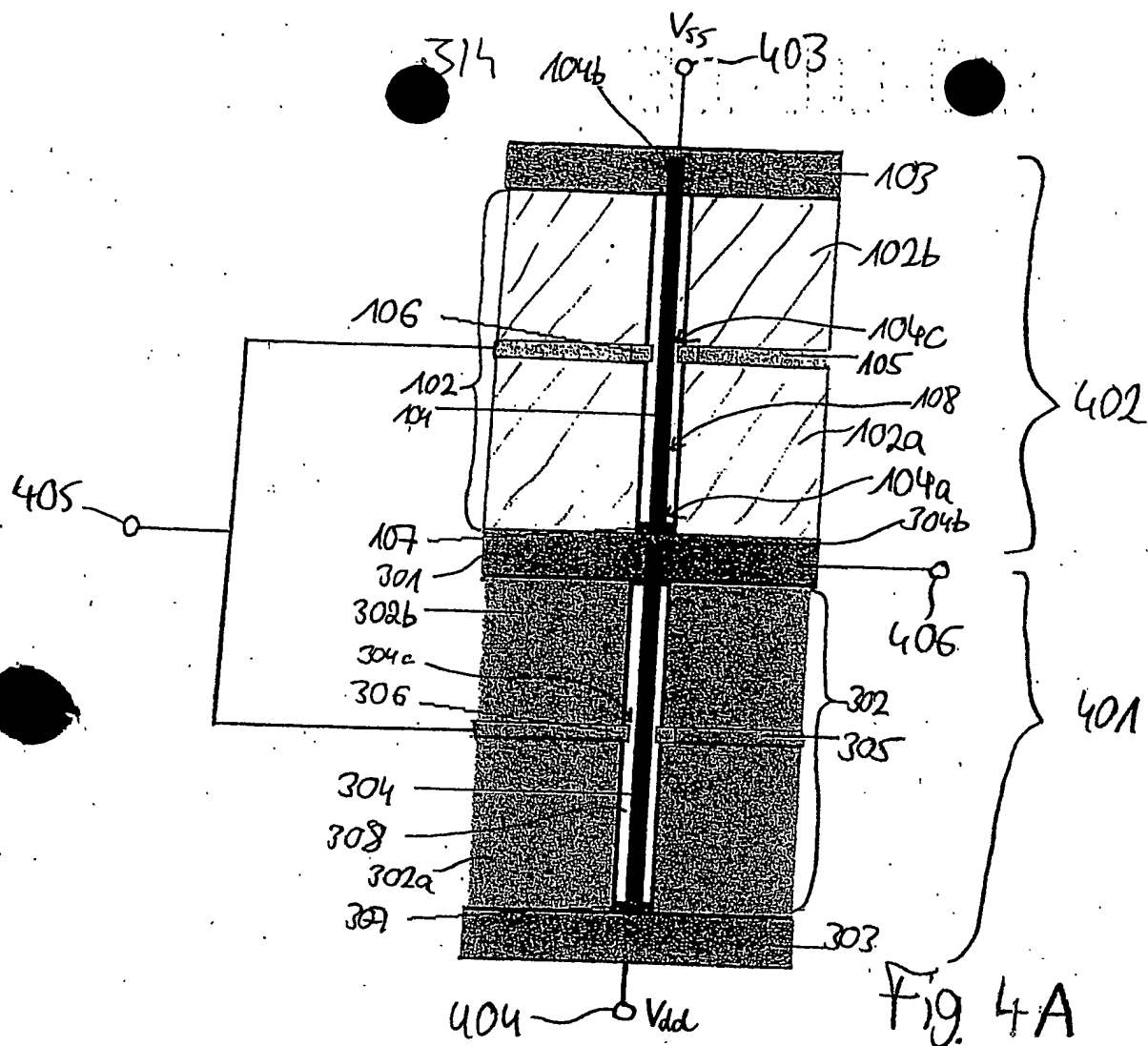
### Zusammenfassung

Vertikal integriertes Bauelement, Bauelement-Anordnung und Verfahren zum Herstellen eines vertikal integrierten Bauelements

Die Erfindung betrifft ein vertikal integriertes Bauelement, eine Bauelement-Anordnung und ein Verfahren zum Herstellen eines vertikal integrierten Bauelements. Das vertikal integrierte Bauelement hat eine erste elektrisch leitfähige Schicht, eine teilweise aus dielektrischem Material ausgebildete Mittel-Schicht auf der ersten elektrisch leitfähigen Schicht, eine zweite elektrisch leitfähige Schicht auf der Mittel-Schicht und eine in ein in die Mittel-Schicht eingebrachtes Durchgangsloch integrierte Nanostruktur mit einem ersten, mit der ersten elektrisch leitfähigen Schicht gekoppelten Endabschnitt und mit einem zweiten, mit der zweiten elektrisch leitfähigen Schicht gekoppelten Endabschnitt. Die Mittel-Schicht weist zwischen zwei benachbarten dielektrischen Teilschichten eine dritte elektrisch leitfähige Schicht auf, deren Dicke geringer ist als die Dicke von zumindest einer der dielektrischen Teilschichten.







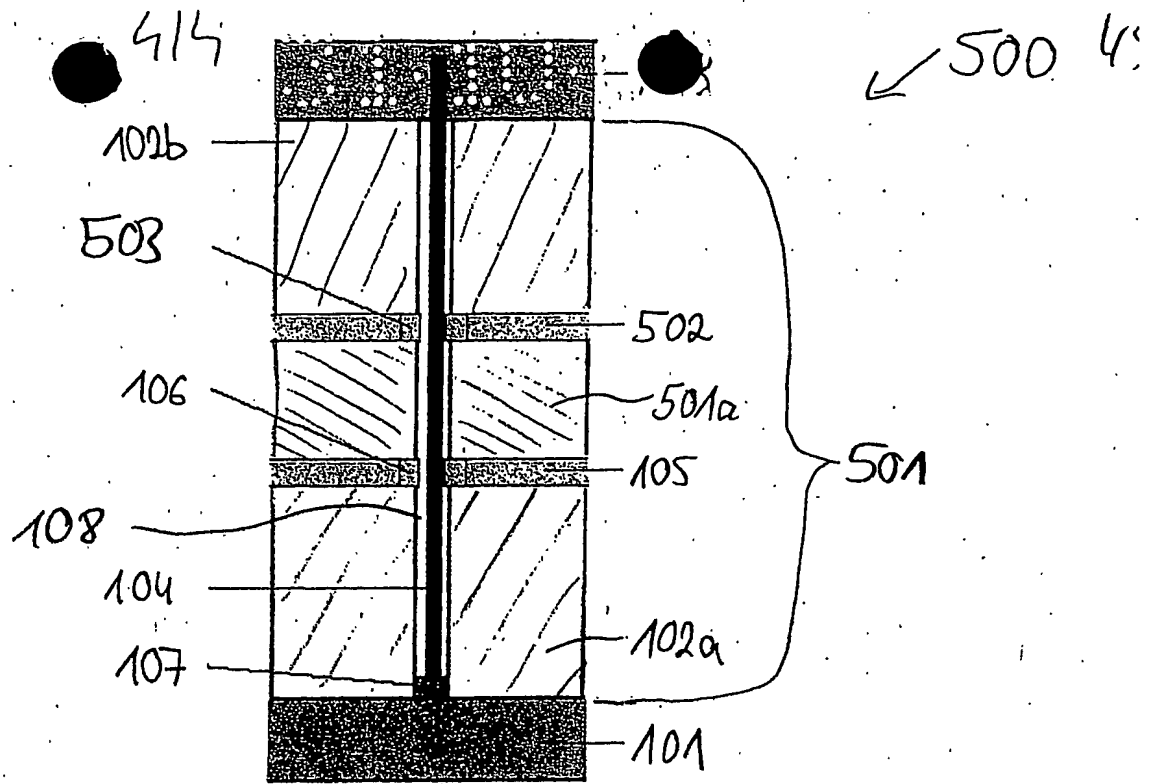


Fig. 5

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning  
Operations and is not part of the Official Record**

**BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

☐ BLACK BORDERS

☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES

☒ FADED TEXT OR DRAWING

☒ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING

☐ SKEWED/SLANTED IMAGES

☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS

☐ GRAY SCALE DOCUMENTS

☒ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT

☐ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY

☐ OTHER: \_\_\_\_\_

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.**